

대기중 유해 화학 물질의 인체 위해도 우선순위 선정 연구

박화성, 김예신, 이동수*, 신동천*

연세대학교 환경공해연구소, *서울대학교 환경대학원

Human Health Risk based Priority Ranking for Hazardous Air Pollutants

Hoa-sung Park, Ye-shin Kim, Dong-soo Lee* and Dong-chun Shin*

Institute for Environmental Research, Yonsei University,

**Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University*

ABSTRACT

Although it is suggested that risk-based management plan is needed to manage air pollution effectively, we have no resources enough to evaluate all aspects of substances and set priorities. So we need to develop a logical and easy risk-based priority setting method. However, it is impossible that only one generic system that is consistent with all the use is developed. In this study, we proposed a human health risk based priority-setting method for hazardous air pollutants, and ranked priorities for this method. First of all, after investigating previous chemical ranking and scoring systems, we chose appropriate indicators and logics to goal of this study and made a chemical priority ranking method using these. As results, final scores in priority ranking method were derived for 25 substances, and ethylene oxide, acrylonitrile and vinyl chloride were included in high ranks. In addition, same substances were highly ranked when using default values like when using no default, but the scores of hydrofluoric acid and cyan and compounds were sensitive to default values. This study could be important that priorities were set including toxicity type and quality and local inherent exposure conditions and we can set area-specific management guidelines and survey plans as a screening tool.

Key words : priority ranking, human toxicity, Toxics Release Inventory (TRI), Hazardous Air Pollutants (HAPs)

서 론

우리나라는 지난 50여년 동안 진행된 급속한 산업화로 인해 현재 생활수준은 현저히 상승하고 편리해졌으나, 그로 인한 부정적 영향 역시 간과할

수 없는 수준에 이르렀다(환경부, 2002b; 김종석, 1991). 그 중에서도 특히 우리가 항상 접하고 숨쉬고 있는 공기의 오염 문제는 국지적인 한 지역의 문제가 아니기 때문에 국제적으로도 큰 관심이 되고 있으며(환경부, 2002b), 현재 우리나라의 대기오염 실태는 외국보다 심각한 수준인 것으로 보고되고 있다(환경부, 2002a). 그러나 대기오염 관리를 위한 우리나라의 사후적 농도 규제에 의존하는 현

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

행의 관리 방식으로는 발생 수준을 억제하기 어렵다. 즉, 외국에서의 규제 물질을 그대로 차용하거나 발암 물질을 관리 대상 목록에 그대로 삽입하는 등, 주로 오염물질의 독성 위주로 관리되고 있어, 국내 대기오염의 배출 및 노출 특성을 제대로 반영하지 못한 채 관리되고 있다. 그로 인해 사전예방의 저감 대책을 수립하지 못하고, 이에 대한 기술개발 및 투자 유인에 미흡한 실정이다(환경부, 2002a; 박화성, 2003).

최근 대기오염 관리안 설정시 세 가지 지표(현재의 대기 농도, 인체 위해성, 경제성)를 기준으로 하는 방법이 적용 가능한 것으로 제안되고 있다. 그러나 이중 현재 대기 농도를 기준으로 대기 관리안을 수립하는 기존의 방식이 대기오염문제 해결에 한계가 있다는 것은 다수가 동의하고 있다. 또한 경제성에 근거한 방법은 대기 기준 준수에 따른 비용과 인체 위해도 저감에 따른 편익을 근거로 하여 평가하지만 현재 근거 자료가 부족한 실정이며, 경제적 편향을 이유로 현 정책에 반영될 가능성은 희박한 것으로 평가된다. 이에 새로운 대안으로서 인체 위해성에 근거한 관리안 설정에 대부분 동의하고 있다(아주대학교, 2003).

따라서 향후 대기 관리안 설정에 있어 가장 효율적인 방법은 인체 위해성을 기준으로 하는 경우로, 대기 기준과 인체 위해성 간의 피드백(feedback)을 통해 최종적으로 대기 기준을 설정하는 것이다(아주대학교, 2003). 또한 이러한 화학물질의 인체 영향에 대한 기초 자료는 주로 세계보건기구(World Health Organization, WHO)가 보유하고 있으며(김종석, 1991), 우리나라도 이의 권장기준을 참고하고 있으나(환경부, 2002b), 국내 고유의 정보 반영 정도가 미흡한 실정이다. 국내에서도 시도적 연구로서 G7 연구 사업에서 인체 위해도에 기초한 관리 우선 순위를 선정한 바 있으나(연세대학교 환경공해연구소, 1998), 실제 반영 정도는 미미했던 것으로 평가된다(박화성, 2003).

이와 같이 잠재적 인체 영향에 기초한 관리 순위를 제공하기 위해서 대기오염물질의 모든 측면을 평가하는 것은 매우 필요한 과정이지만 그에 대한 시간이나 재원은 부족한 실정이며, 또한 위해도에 기초하는 좀 더 논리적이고 손쉬운 방법 및 이를 토대로 한 효율적 관리방안을 필요로 한다(Gary *et al.*, 1994). 또한 점차 국민들의 환경에 대한 요구는

높아져가기 때문에, 정부는 가능하다면 이론적이고, 경제적인 접근 방법을 적용하여 많은 수의 화학물질에 대한 기준을 수립할 것을 요구받고 있다. 기준이 필요한 화학물질을 선정하는 최종적 해결 방안은 포괄적 위해성 평가를 실시하는 것이며, 화학물질 우선순위 선정은 위해성 평가를 위한 결과를 손쉽고 논리적으로 도출할 수 있기 때문에, 이러한 측면에서 화학물질 우선순위 선정 기법을 제안하는 것은 중요한 시작점이 될 수 있다(Mary *et al.*, 1997a).

이에 본 연구에서는 기존의 우선순위 선정 기법들을 검토·수정하여 국내에서 현재 구체적인 관리 기준이 제시되고 있지 않은 대기오염물질, 즉 대기 중 유해화학물질(hazardous air pollutants, HAPs)에 대한 인체 위해도 우선순위 도출 방법 및 그 결과를 제시하고자 하였다.

내용 및 방법

1. 연구 내용

본 연구의 목적에 적합한 기법을 제안하기 위하여 주로 US EPA (1994a)의 연구에서 고찰된 우선순위 선정 기법 중 목적 및 전개 논리가 뚜렷하나 정교함의 차이가 있는 일부 기법에 대해 중요한 지표(indicator) 및 전개 논리를 중심으로 비교·검토하고(김예신 등, 2003), 이를 토대로 우선순위 선정 기법을 구성하였다.

HAPs의 인체 위해도를 표현하기 위해 채택한 지표는 크게 7 가지로, 노출 잠재력과 관련된 지표는 물질의 이동성(mobility), 환경 중 지속성(persistence), 배출량(released amount) 범주에 대하여 각각 물질의 증기압(vapour pressure), 공기 중에서의 반감기(half-life in air), 국내 TRI(Toxic Release Inventory) 자료에 보고된 대기 중으로의 배출량을 선정하였다. 인체 영향 관련 지표는 포유류에 대한 흡입 급성 독성(inhalation acute toxicity), 흡입 만성 독성(inhalation chronic toxicity), 발암성(carcinogenicity) 및 돌연변이원성(mutagenicity) 등의 5 가지 독성을 포함한 기타 독성(other specific toxicity) 결과 유무로 선정하였다.

현재 국내에서 대기오염의 우려 수준이 높은 것으로 평가되고 가장 많은 수의 화학물질 배출량이

Table 1. Scoring criteria for acute and chronic toxicity

Endpoints	Score	1	2	3	4	5	References
inhalation LC ₅₀ (mg/m ³)*		> 15,000	~ 15,000	~ 1,500	~ 150	15	Environment Canada, 1994
inhalation NOAEL (mg/m ³)**		> 3,000	~ 3,000	~ 300	~ 30	≤ 3	Environment Canada, 1994

*LC₅₀ (lethal dose); **NOAEL (No Observed Adverse Effect Level)

보고되고 있는 울산광역시를 대상으로 (환경부, 2002c), 개별 물질의 각 지표에 대한 값을 결정하였다. 이때 각 지표에 대해 신뢰도가 높은 것으로 평가되고 (Erin *et al.*, 2000; Hansen *et al.*, 1999; Mary *et al.*, 1997a; US EPA, 1994b) 접근이 용이한 데이터베이스를 이용하였다. 즉 흡입 급성 독성치는 HSDB (Hazardous Substances Data Bank), EU (European Union)의 IUCLID (International Uniform Chemical Information Database), 환경부의 화학물질 정보센터, NTP (National Toxicity Program)의 값을 이용하였고, 흡입 만성 독성치는 미국 EPA (Environmental Protection Agency)의 IRIS (Integrated Risk Information System), EU의 IUCLID의 값을 이용하였다. 또한 발암 등급에 대한 자료는 미국 EPA의 IRIS, IARC (International Agency for Research on Cancer), ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)의 정보를 이용하였으며, 기타 독성에 대한 정보는 HSDB와 NTP에서의 실험 결과를 토대로 정리하였다. 증기압과 반감기에 대한 정보는 HSDB를 이용하였고, 배출량은 환경부의 국내 배출량 보고 자료를 이용하였다.

여러 자료원을 통해 각 지표에 대한 값이 여러 가지로 제시될 경우, 가장 민감한 값을 대표값으로 결정하였으며, 발암 등급의 경우에는 자료원의 특성에 따라 우선순위를 두어 적용하였다. 결정된 각 지표에 대한 값을 일정한 원리에 따라 점수로 변환하고, 이 점수를 이용하여 우선순위를 도출하였다.

2. 연구 방법

1) 인체 독성

인체 독성에 대한 지표는 크게, 일반적인 흡입 급성 독성 및 흡입 만성 독성, 발암 등급, 기타 만성 독성 결과를 선정하였다. 일반 독성에 대한 지

Table 2. Scoring criteria for cancer classification

Score	1	2	3	4	5
Data sources*					
IRIS	E	D	C	B	A
IARC	4	3	2B	2A	1
ACGIH	-	A4	A3	A2	A1

Sources : US EPA, 1994b

*IRIS (Integrated Risk Information System); IARC (International Agency for Research on Cancer); ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists); NTP (National Toxicology Program); EC (European Commission)

표로는 대부분의 인체 독성을 고려하는 시스템에서 채택하고 있는 지표인 포유류에 대한 흡입 급성의 LC₅₀ (lethal concentration)과 흡입 만성 NOAEL (No Observed Adverse Effect Level)을 채택하였다. 독성값을 점수로 전환할 때 이용한 점수 척도는 여러 기존 우선순위 선정 기법 별로 큰 차이가 없었으므로 (김예신 등, 2003; Erin *et al.*, 2000; Environment Canada, 1994; US EPA, 1994b), 본 연구에서 설정한 지표와 설정 목적을 반영하여 점수 척도를 적용하였다 (Table 1).

발암성에 대한 지표로는 화학물질의 발암성을 평가하는 기관에서의 발암 분류 등급을 지표로서 선정하였다. 발암성에 대해서는 발암 분류 등급이나 발암력 (slope factor) 등을 지표로 적용할 수 있으나, 발암력은 정량적 지표로서 발암 등급보다 가용성이 떨어지며 등급 분류 자체만으로도 신중하게 분류된 결과로 판단되므로 (Mary *et al.*, 1997a), 본 연구에서는 발암 등급을 발암성의 지표로서 채택하였다. 발암 등급을 점수로 할당할 때, 위험도에 기반하여 발암 등급을 제시하고 있는 미국 EPA의 IRIS를 가장 우선 순위로 두고 점수를 산출하였다. 이 자료가 가용하지 않은 경우, 대상 물질수가 비교적 많은 것으로 평가되는 IARC의 등급 (Mary *et al.*, 1997a)을 적용하고 그 외의 경우에는 ACGIH에서의 발암 분류 등급을 적용하였다. 이때 각 기

관에서의 등급에 대한 정의를 EPA의 분류 범주와 동일하게 두고 점수를 부여하였다 (Table 2).

기타 만성 독성에 대한 지표로는 돌연변이원성 (mutagenicity), 생식 독성 (reproductive toxicity), 발육 독성 (developmental toxicity), 신경행태 독성 (neurobehavioral toxicity), 면역 독성 (immunotoxicity) 이상 5가지로 선정하였다. 이는 기존 시스템을 참고하여 선정한 것으로 각 영향의 endpoints를 정의하고 (US EPA, 1999; US EPA, 1998; US EPA, 1996; US EPA, 1991; US EPA, 1986), 이에 해당하는 자료를 정리하였다. 각 영향에 해당되는 연구 자료가 가능하다면 SCRAM (Chemical Scoring and Ranking Assessment Model)이나 ARET (Accelerated Reduction/Elimination of Toxics)와 같이 점수 척도를 적용하여 '0점'이 도출되지 않도록 하는 것이 바람직하나 (Erin *et al.*, 2000; Environment Canada, 1994), 실제 이러한 형태의 자료가 거의 가용하지 않기 때문에, 본 연구에서는 CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies)의

점수 부여 방법을 참고하여 각 세부 지표에 대한 양성의 실험 결과가 보고되는 경우 '1점', 그렇지 않은 경우 '0점'을 부여한 후, 5가지에 대한 점수를 합산하였다 (US EPA, 1994b).

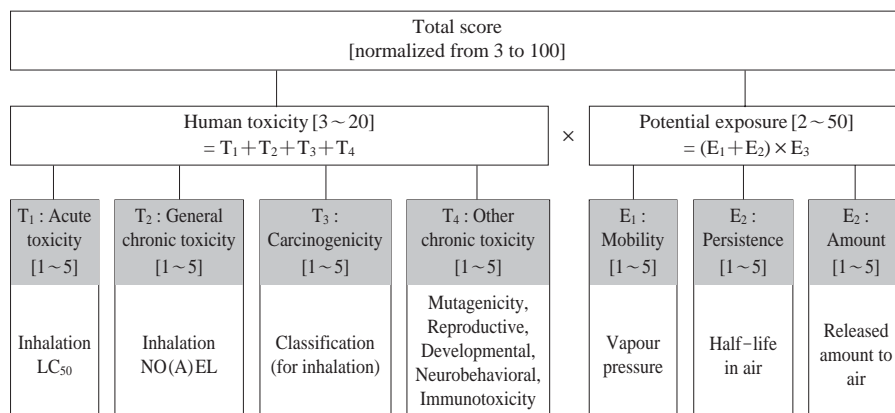
최종적으로 점수로 도출된 4가지 독성 지표를 모두 합산하여 3~20점의 인체 독성 점수를 산출하였다.

2) 노출 잠재력

노출 잠재력에 대한 지표는 대기오염물질의 이동성, 지속성, 배출량으로 선정하였다. 물질의 이동성에 대한 지표로는 대기중 이동을 설명하기 위하여 동적인 움직임이 있는 유체 내에서 화학물질의 이동을 설명하는 변수인 증기압을 선택하였다 (Hansen *et al.*, 1999). 이때, 본 연구에서는 유럽에서 이용하는 화학물질 우선순위 선정 기법인 EURAM (European Union risk RAnking Method)에서의 인체 노출 부분을 설명하기 위해 이용한 증기압에 대한 점수 척도를 조정·적용하였다.

Table 3. Scoring criteria for exposure potential

Score		1	2	3	4	5
Endpoints						
Mobility	Vapour pressure (hPa)	≤ 0.5	0.5 ~ 5	5 ~ 50	50 ~ 500	> 500
Persistence	T _{1/2} in air (days)	≤ 4	4 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100	> 100
Released amount	Amount to air (kg/year)	≤ 1,000	1,000 ~ 10,000	10,000 ~ 100,000	100,000 ~ 1,000,000	> 1,000,000



T_i : Toxicity score for each toxicity endpoint, E_i ; Exposure score for each exposure

Fig. 1. Algorithm for priority ranking of hazardous air pollutants.

Table 4. Estimation methods using substitutional data for each endpoint[†]

Endpoint	Available data	Estimation methods	References
Acute toxicity LC ₅₀	• Data from tests of another unit (ppm)	• $\text{ppm} \times (\text{MW}/22.4) = \text{mg}/\text{m}^3$	• US EPA, 1994b
	• Data from tests of eight hours or less were used	• $\text{LC}_{50\text{thr}} \times T = \text{LC}_{504\text{hr}} \times 4$	• Mary BS <i>et al.</i> , 1997a
Chronic toxicity Inhalation NOAEL	• Data from subchronic tests (28~90days)	• $\text{NOAEL} \div 5$	• Erin MS <i>et al.</i> , 2000 Rachel RM, 2002
	• Data from LOAEL tests	• $\text{LOAEL} \div 10$	• Erin MS <i>et al.</i> , 2000 Rachel RM, 2002
	• Data from RfC*	• $\text{RfC} \times \text{UF}$	• US EPA IRIS, 2002
	• Data from LC ₅₀	• $\text{LC}_{50} \times \text{constant} (10^{-5})^{**}$	• Layton DW <i>et al.</i> , 1987

[†]LC₅₀ (Lethal Concentration); ppm (part per million); MW (molecular weight); NOAEL (No Observed Adverse Effect Level); LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level); RfC (Reference Concentration); UF (uncertainty factor); WOE (weight-of-evidence)

*RfC derived from BMD (benchmark dose) or LEL (low effect level)

**NOAEL/LC₅₀ ratio for chemicals having both of two values (Layton *et al.*, 1987)

물질의 지속성에 대한 지표로는 대부분의 우선 순위 선정 시스템에서 이용하고 있는 반감기를 채택하였으나, 본 연구 결과의 목적에 맞게 공기 중에서의 반감기만을 적용하고, 이때의 점수 척도 역시 여러 가지 기준 우선순위 선정 기법에서의 수치가 동일하였으므로, 이를 적용하였다(김예신 등, 2003; Erin *et al.*, 2000). 또한 물질의 배출량에 대한 지표는 대기 중으로의 배출량을 채택하였으며(환경부, 2002c), 점수 척도는 자료의 분포를 고려하여 대상물질이 고르게 1~5점을 받을 수 있도록 설정하였다(Table 3) (환경부, 2002c; Mary *et al.*, 1997a).

최종적으로 3가지 지표에 대하여 각각 1~5점이 산출되고, 물질의 특성 정보인 이동성과 지속성은 배출량 정보와 ‘곱’의 관계에 있으므로(US EPA, 1994b; Hansen *et al.*, 1999), 앞서 두가지 지표는 더하고, 배출량 점수를 곱하여 2~50점의 노출 잠재력 점수를 산출한다.

인체 독성 지표에 대한 점수를 모두 합산하고, 노출 잠재력 지표에 대한 점수를 모두 합산하여, 각각의 비율이 최종 점수에 대한 기여율이 동일하도록 하기 위하여 10점으로 조정하고(Hansen *et al.*, 1999), 이 둘을 곱하여 최대 100점이 되도록 한 후 순위 선정에 이용하였다(Fig. 1).

3) 우선순위 선정을 위한 자료 수집 및 추정

앞서 설명한 인체 독성 및 노출 잠재력에 대한 지표 및 점수 척도를 적용하여 국내에서 배출량이 가장 많이 보고되고 있는 울산광역시에서의 TRI내

물질 46종에 대한 우선순위를 도출하고자 자료를 수집하였다.

선정한 자료원을 이용하여 1차적으로 자료를 정리한 후 자료가 없는 경우에는 표 4와 같은 방법으로 data gap을 처리하였다. 즉, 대체 자료가 이용 가능한 경우에는 기존 문헌에서의 원칙에 따라 대체 자료를 원하는 형태로 변환하여 이용하였다(Table 4). 이때 Layton *et al.* (1987)의 연구에 따라 임시적으로 급성 독성 결과를 이용하여 만성 독성치를 추정하는 방법을 적용하는 경우, 추정하기 위해 이용하는 상수가 10^{-5} 으로 대부분의 만성 독성치가 5점에 할당되게 되어, 결손 자료(missing data)에 대해서 default값을 5점으로 부여하는 것과 다른 결과를 얻을 수 없으므로 실제 본 연구에서는 적용하지 않았다.

또한 증기압과 반감기 등의 지표는 EPIwin (version 3.10) (Estimation Programs Interface for Windows) (US EPA, 2001)을 이용하여 추정하였다. 추정 방법이 부족하여 결과가 도출되지 않는 일부 물질에 대해서는 default값을 최소값(1점), 중간값(3점), 최대값(5점)으로 적용하여 순위를 도출하였다. 이때 기타 만성 독성에 대해서는 default값을 적용하지 않았으며, 중금속 화합물에 대해서도 우선순위 선정 기법이 적용될 수 있도록, CHEMS-1에서 사용한 전문가들에 의해 결정된 해당 화합물의 가장 보편적인 물질에 대한 정보를 이용하였다(US EPA, 1994b).

4) 우선순위 선정 기법에 대한 평가

우선순위 선정 기법을 개발하는 목적의 하나는 우선순위 목록 결정에 대해 하나의 지표가 결과를 과도하게 좌우하지 않도록 하는 것이다. 어떤 특정 지표가 화학물질의 최종 점수에 영향을 미치는지 알아보기 위해서, 각 지표의 항목 점수 및 최종 점수에 대한 회귀 분석(regression analysis)을 실시하였다. 분석 결과 도출되는 상관 계수(correlation coefficient, r) 값이 극한으로 높거나 낮지 않고, 부호를 무시하고 0.4~0.6으로 나오면 각 지표들이 최종 점수에 대해 적절한 수준으로 반영되었다는 것을 나타내는 것이다(Mary *et al.*, 1997b). 또한 기법을 구성하는 지표는 또한 서로 각자에 독립적인 것이 바람직하며(Mary *et al.*, 1997b), 이를 평가하기 위하여 각 지표간 상관성을 검토하여 지표 선정이 적절하였는지 평가하였다.

결과 및 토의

1. 우선순위 결과에 대한 평가

기존의 화학물질 우선순위 선정 기법을 고찰하여 본 연구 목적에 맞는 부분을 반영하거나 새로 개발하여 화학물질의 각 지표에 대한 위험 정도를 점수화하고, 대기중 유해화학물질에 대한 우선순위 선정을 위해 동일한 척도를 이용하여 순위를 도출하고자 울산지역의 TRI 물질 46종을 대상으로 평가하였다. 연구 결과 화학물질의 순위가 수치로 제공된다고 하더라도 결과를 대표치로서 이용할 수는 없기 때문에, 결과 도출에 이용된 자료의 고유한 불확실성과 변이성을 고려하여 결과를 적절하게 해석하기 위하여, 화학물질을 집단(group)으로서 평가하였다(Mary *et al.*, 1997b).

도출된 46종의 물질 순위중 상위 16순위 물질(약 상위 30%)을 Table 5에 제시하였다. 그 결과 주로 상위 물질군은 VOCs(Volatile Organic Compounds)로 구성되어 있었으며 그 외 비휘발성의 유기물질, 농약류 등이 상위에 추출되었다. 최상위에 오른 ethylene oxide는 비휘발성 유기물질로 배출량 점수는 중간수준이었으나, 독성 및 물성 인자에 대한 점수가 매우 커서 최종 위해도 점수가 크게 산출되었으며, 반대로 xylenes의 경우에는 VOCs군으로 독성이나 물성 인자 점수는 낮았으나 배출량

이 커서 상위 순위로 추출되었다.

대기중의 배출량 자료가 존재하는 물질만을 대상으로 하였기 때문에 전체 46종 내에서도 VOCs류가 많았으며, 주로 반감기가 짧기 때문에 상위 물질군의 전체 점수에 대한 노출 인자의 기여율은 약 30~40% 수준이며, 대부분 독성 인자의 기여율이 50% 이상이었다.

일반적으로 지속성이 크고 발암성이 있는 것으로 알려진 중금속류는, 기존의 우선순위 선정 기법은 주로 인체 및 생태에 대한 영향을 포괄하고, 주로 수계로 배출되는 오염물질에 대해 적용되기 때문에 상위로 선정되어 있다(ECB, 2003; Rachel *et al.*, 2002; US EPA, 1998b; Environmental Canada, 1994; US EPA, 1994b). 그러나 본 연구에서는 대기중 유해화학물질의 인체 위해도에 입각한 우선순위를 도출하기 위한 목적으로 기법을 적용하여 대기중으로 배출량이 보고되는 물질만을 대상으로 우선순위를 산출하였기 때문에 기존 기법을 이용한 결과와는 다른 결과가 도출되었다. 또한 일부만이 대기중으로의 배출량이 보고되고 있으며, 그 중에서도 chromium 이나 cadmium compounds 등, 유해성이 잘 알려진 물질군의 배출량은 '1점' 수준으로 대부분 적은 편이었으며, 배출량이 1점 이상인 두가지 물질중 zinc compounds는 독성 점수가 낮거나, cyan compounds의 경우에는 각 지표에 대한 정보가 대부분 부족하여 본 연구에서는 중금속류가 상위에 추출되지 못하였다. 즉 연구 목적에 따라 적용되는 기법 및 결과가 다양하므로, 목적을 명확히 규명하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 상위로 추출된 물질중 암모니아는 실제 환경 중에서 완충작용으로 인해 생물에 유해한 영향을 직접적으로 미치지 않으나(Mary *et al.*, 1997b), 그 배출량이 많고, 일반적으로 독성이 커서 순위가 높게 산출되는 것은 스크리닝 단계에서의 하나의 문제점이라고 할 수 있다.

또한 각 지표에 대해 모두 값이 있어 점수가 도출되는 물질 25종 이외에, 값이 없는 물질에 대해서 default값을 1~5점 범위에서 최소값, 중간값, 최대값으로 적용한 경우, 상위 물질군(46종 중 16순위 내 물질)은 크게 변화하지 않았으나, 일부 지표에 대한 결손 자료가 많은 hydrofluoric acid나 cyan and compound는 default값이 커질수록 순위가 높

Table 5. Values, scores and data sources on each endpoint of priority substances

Rank	Substances	Acute toxicity		Chronic toxicity		Carcinogenicity		Other chronic toxicity		Toxicity score	Mobility		Persistence		Released		Exposure score	Final score
		LC ₅₀ (mg/m ³)	Score Sources	NOAEL (mg/m ³)	Score Sources	Classification	Score Sources	Toxicity*	Score Sources		Vapour pressure (hpa)	Score Sources	T _{1/2} in air (days)	Score Sources	To air (kg/yr)	Score Sources		
1	Ethylene oxide	1,119.4	2 2	9.0	4 4	1	5 6	M,R,D,N,I	5 2	16	1,751.4	5 2	211.0	5 2	10,884.0	3 9	30	48.0
1	Acrylonitrile	1,006.9	3 1	0.2	5 5	B1	4 5	M,R,N,I	3 2,3	15	145.3	4 2	83.0	4 2	201,909.7	4 9	32	48.0
3	Vinyl chloride	147,000.0	1 4	2.5	5 5	A	5 5	M,R,D,N,I	5 2	16	3,972.0	5 2	2.3	1 2	136,930.0	4 9	24	38.4
4	Ammonia	804.5	3 1	2.3	5 5	-	0 -	N	1 2	9	10,010.0	5 2	4,166.7	5 10	435,951.0	4 9	40	36.0
5	Benzene	34,805.3	1 1	3.5	4 4	A	5 5	M,R,D,N,I	4 2,3	14	126.4	4 2	13.0	2 2	426,242.8	4 9	24	33.6
5	Epichlorohydrin	2,065.4	2 1	0.1	5 5	B2	4 5	M,R,D	3 2,3	14	21.9	3 2	370.6	5 2	75,379.0	3 9	24	33.6
7	Methyl chloride	5,300.0	2 1	94.6	3 5	D	2 5	M,R,D,N	4 2,3	11	5,731.4	5 2	310.0	5 2	12,329.0	3 9	30	33.0
8	Formaldehyde	0.005	5 1	1.2	5 4	B1	4 5	M,R,D,I	3 2,3	17	5,185.0	5 2	1.7	1 2	21,464.0	3 9	18	30.6
9	Chloroform	47,702.0	1 1	-	0 -	B2	4 5	M,R,D,N	3 2,3	8	262.6	4 2	151.0	5 2	250,742.7	4 9	36	28.8
9	1,3-butadien	135,000.0	1 2	20	5 5	B2	4 5	M,R	2 2	12	2,812.4	5 2	1.5	1 2	103,748.0	4 9	24	28.8
11	Methylene Chloride	25,750.0	1 2	-	0 -	B2	4 5	M,N	2 2	7	579.8	5 2	119.0	5 2	268,740.0	4 9	40	28.0
12	Acetaldehyde	200.9	2 2	1.7	5 5	B2	4 5	M,D,N	3 2	14	1,202.3	5 2	1.0	1 2	69,800.0	3 9	18	25.2
13	Vinyl acetate	276.8	2 2	5.0	4 5	2B	3 6	M,R	2 2	11	120.2	4 2	0.6	1 2	105,939.0	4 9	20	22.0
14	Carbon tetrachloride	8,000.0	2 1	-	0 -	B2	4 5	M,I	2 2	8	153.3	4 2	133,590.0	5 2	22,677.0	3 9	27	21.6
15	Styrene	220.5	2 2	34.0	3 5	2B	3 6	M,R,D,N,I	5 2,3	13	8.5	3 2	0.7	1 2	404,135.8	4 9	16	20.8
16	Xylene	23,700.9	1 1	7.8	4 5	3	2 6	M,R,D,N,I	3 2	10	10.6	3 2	1.2	1 2	1,256,894.3	5 9	20	20.0

Sources : 1 (KCIC, 2003); 2 (HSDB, 2003); 3 (NTP, 2003); 4 (EU, 1996); 5 (US EPA IRIS, 2003); 6 (IARC, 2003); 7 (ACGIH from HSDB (2003)); 8 (EC from HSDB (2003)); 9 (MOE, 2002c); 10 (US EPA, 2001)

*M (presence of a positive result for mutagenicity); R (presence of a positive result for reproductive toxicity); D (presence of a positive result for developmental toxicity); N (presence of a positive result for neurobehavioral toxicity); I (presence of a positive result for immunotoxicity)

아저 이에 민감한 것으로 나타났다.

2. 우선순위 선정 기법 구성 요소에 대한 평가

기법내 어떤 특정 지표가 화학물질의 최종 점수에 영향을 미치는지 알아보기 위해서, 각 지표의 항목 점수 및 최종 점수에 대한 회귀 분석(regression analysis)을 실시한 결과(Table 6), 본 연구에서는 기타 독성 및 증기압, 배출량 등으로 인한 영향이 주된 것으로 나타났으며, 이는 점수 척도를 조정하는 등의 보완을 통해 최종 결과에 대한 각 지표의 기여도를 조정할 필요가 있을 것이다. 또한 이는 평가 대상 물질수가 제한적이었으므로, 적절한 수준의 상관계수를 도출하기가 어려웠기 때문

Table 6. Correlation coefficients (r) from linear regression analysis of parameter values versus final scores and sub-scores

Parameters	r		Number of data
	r_1	r_2	
Log inhalation LC ₅₀	0.0001	0.0255	37
Log inhalation NOAEL	0.1368	0.0855	24
Carcinogenicity	0.0443	0.1896*	44
Other specific effects	0.2335*	0.3808*	46
Vapour pressure	0.2586*	0.2867*	44
Half-life in air	0.0037*	0.0311	44
Released amount	0.1028*	0.1402*	46
Human toxicity ^a	0.4488*	–	46
Exposure potential ^b	0.7909*	–	46

r_1 : correlation coefficient of the parameter to final score

r_2 : correlation coefficient of the parameter to human toxicity score or exposure potential score

^aSCORE_{acute} + SCORE_{chronic} + SCORE_{cancer} + SCORE_{other}

^b(SCORE_{Vapour pressure} + SCORE_{half-life}) × SCORE_{amount}

* $p < 0.05$

인 것으로 생각된다.

지표간의 독립성을 검토하기 위하여 상관성 분석을 실시한 결과는 Table 7에 제시하였으며, 만성 영향, 발암성과 기타 독성간의 상관성이 예상되었으나 각각의 상관성의 r 값이 모두 절대값 0.5 미만으로 둘 간의 상관성이 강하지는 않은 것으로 나타났다. 그 외에도 지표간의 상관성은 높지 않았으며 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 즉 물질의 위해도를 설명하기 위한 지표 선정은 적절하였던 것으로 판단된다.

3. 이용 자료에 대한 고찰

결과 도출에 이용된 각각의 항목과 해당 지표들은 기존의 연구를 토대로 하여, 본 연구의 목적에 맞게 구성한 것이다. 인체에 대한 급성 및 만성 독성 영향에 대해서 일반적으로 우선순위 선정 기법 적용시 LC₅₀과 NOAEL을 지표로 많이 적용하지만, 대상물질에 대한 지표중 이에 대한 가용성이 낮은 편이었다. 또한 이중에서도 포유류에 대한 만성 독성값은 도출하기 위한 시간 및 자원 소요가 크기 때문에 실제의 값을 도출하기도 쉽지 않고 (Mary *et al.*, 1997a), 대체 사용 가능한 LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level)이나 아만성 독성 결과 등을 이용할 수도 있으나, 이 역시 제한적이었다. 최근 TOPKAT (Toxicity Prediction by Komputer-Assisted Technology)과 같은 QSAR (Quantitative structure-activity relationship) 모델의 이용이 제안되고 있으나 (Mary *et al.*, 1997a), 본 연구에서는 현재 가용한 범위 내에서 자료를 구성하였으므로, 차후 추정 모델의 이용 가능성에 대해서도 재고할 필요가 있다. 또한 만성 독성의 지표인

Table 7. Correlation coefficient (r) from linear regression analysis between individual parameter values

Endpoints	Log LC ₅₀	Log NOAEL	Carcinogenicity	Other toxicity	Vapour pressure	Half-life	Amount
Log LC ₅₀	1.000						
Log NOAEL	0.373	1.000					
Carcinogenicity	-0.010	-0.290	1.000				
Other toxicity	0.279	0.412*	0.270	1.000			
Vapour pressure	-0.243	-0.038	-0.222	0.010	1.000		
Half-life in air	0.033	-0.210	0.080	-0.060	-0.040	1.000	
Amount	0.224	<0.001	-0.168	0.163	0.085	-0.066	1.000

* $p < 0.05$

NOAEL 역시 다양한 endpoints를 갖고 있으나, 이러한 영향의 심각도 차이를 반영하지 못하였으므로, 차후 영향의 심각도를 고려하여 지표로서 삼입할 필요가 있다.

노출 관련 지표는 대기 중에서의 화학물질의 기본적인 이동 양상인 이류(advection) 및 반응성을 대표하는 증기압과 대기중 반감기를 설정하고, 양적인 개념을 적용하기 위하여 대기중으로의 배출량을 설정하였으며, 배출량 자료 이용시 휘발성이 큰 물질의 경우에는 수계로 배출되는 과정에서 대기중으로 휘발될 가능성이 있으나 본 연구에서는 이러한 가능성은 배제하고 '대기'라는 매체에 직접적으로 배출되는 양만을 고려하였다. 이때 배출량 조사 과정에서 보고자의 전문성 부족 및 조사 대상 물질의 누락 등이 변수로 작용할 수 있기 때문에, 이에 대한 불확실성이 반드시 고려되어야 하며, 국가적 차원에서도 좀더 포괄적이고 체계적인 조사 계획과 조사 자료의 신뢰성 확보 방안이 수반되어야 할 것이다.

4. 우선순위 선정 기법에 대한 고찰

우선순위 선정 기법 내에서 임의로 과도한 점수를 부여하거나 잠재적 불확실성 상수를 과도하게 부여하는 것을 방지하기 위하여 일반적으로 가장 민감한 영향이 상대적 우선순위 선정에 이용되어야 한다고 제안되고 있어(Mary *et al.*, 1997a), 이를 최대한 반영하고자 하였으며, 특히 독성값의 경우 여러 자료원에서 다양한 수치가 제안되는 경우 가장 낮은 값을 채택하여, '의음성(false negative)'의 영향을 배제할 수 있도록 하였다.

또한 배출량 목록에서의 중금속 화합물을 CHEMS-1에서 이용한 전문가들에 의해 결정된 가장 보편적으로 이용되는 해당 중금속의 형태에 맞게 물질을 대체하였으나, 이는 우리나라의 산업 구조에서는 다른 형태일 수 있으므로, 우리나라에서도 이와 같은 조사를 수행하여 중금속 화합물의 대표적 화학물질 형태를 결정하여 이용하는 것이 바람직할 것이다.

대상물질 46종중 선정한 위해도 지표에 대한 값이 없는 경우, 본 연구에서는 default값을 다양하게 적용하여 최종 점수를 비교하는 수준의 불확실성을 평가하였으나, 상위 물질의 경우 각 지표에 대

한 값이 대부분 존재하였기 때문에 결과에는 반영되지 않았다. 또한 각 지표간의 상관성 및 독립성을 평가하였으나, 이는 차후 민감도 분석을 통하여 좀더 계량적으로 표현하고, 피드백(feedback)을 통해 최종 결과에 대한 각 지표의 기여율이 유사하도록 조정하여 객관적 평가를 수행할 수 있도록 해야 한다.

현재 관리가 필요한 화학물질 선정의 궁극적 해결 방안이 되는 위해성 평가에 필요한 정량적 지표의 가용성이 떨어지기 때문에, 본 연구에서 제안한 우선순위 선정 기법은 차후 대기오염물질을 관리하기 위한 스크리닝 수단으로서, 기존의 독성 실험 결과에 기초하여 독성의 형태 및 질만을 고려하여 관리 대상물질을 획일적으로 선정하던 방법에 비해 대상 지역의 노출 상태지역별 특성을 고려하여 실제 현장에서 체계적인 노출 평가가 실시되어야 할 물질을 선정하고, 그에 대한 현장 조사 계획 수립에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 차후 이를 이용하여 위해성 평가를 실시할 때에는 환경내 산/염기 완충능이나 중금속의 착화합물 등과 같은 환경 자체의 영향을 포함하여 평가할 필요가 있다. 또한 정리된 자료 및 로직을 토대로 인체 위해도 뿐만 아니라 생태 위해도 등, 화학물질의 유해 영향을 포함하여 평가하는 우선순위 선정 기법을 제안할 수 있을 것이다.

결 론

본 연구에서는 대기중 유해화학물질의 위해도, 즉 독성 및 노출 가능성에 기초한 우선순위 선정 기법을 제안하고, 실제 이를 적용하여 다음과 같은 주요 연구 결과들을 도출하였다.

첫째, 기존의 화학물질 우선순위 선정 시스템을 토대로 국내에서의 대기중 유해화학물질에 대한 위해도 우선 순위를 도출하기 위하여 흡입의 급성, 만성 독성 및 노출과 관련한 지표를 결합하여 우선순위 선정 기법을 구성하였다.

둘째, 이 선정 기법을 배출량 정보가 많이 있는 울산 지역에 적용하였을 때 인체 위해도 우선순위는 ethylene oxide, acrylonitrile, vinyl chloride, ammonia, benzene, epichlorohydrin 순으로 주로 VOCs군이 우선순위 물질로 추출되었다.

셋째, 순위를 도출하는 과정에서 선정한 독성 지표에 대한 자료가 부족하였으나, 추정 모델에 대한 가용성을 검토하지 않았으므로, 이에 대해 재고해 보아야 할 것이다. 또한 배출량과 관련하여 보고자의 전문성 부족 및 조사 대상 물질의 누락 등이 변수로 작용할 수 있기 때문에, 이에 대한 불확실성이 반드시 고려되어야 하며, 국가적 차원에서도 좀 더 포괄적이고 체계적인 조사 계획과 조사 자료의 신뢰성 확보 방안이 수반되어야 할 것이다.

넷째, 본 연구는 기존의 독성 실험 결과에 기초하여 독성의 형태 및 질만을 고려하여 관리 대상 물질을 획일적으로 선정하는 방법에 비해 대상 지역의 노출 상태까지 포함하여 체계적이고 과학적인 방법으로 위해성 평가 수행에 앞서 스크리닝 수준에서의 우선순위를 도출할 수 있는 방법을 제안하고자 하는 점에서 의의가 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년 환경부의 “차세대 핵심환경기술포럼사업”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김예신, 박화성, 이동수, 신동진. 화학물질 우선순위 선정 기법에 대한 비교 분석 연구, 한국환경독성학회지 2003; 18(3): 183-191.
- 김종석. 대기 환경 기준 설정 배경에 관하여, 한국대기보전학회지 1991; 7(1): 67-71.
- 박화성. 대기중 유해화학물질의 위해도 우선순위 선정 기법과 적용성 연구, 연세대학교 보건대학원 석사학위논문, 2003.
- 아주대학교. 대기오염의 위해성평가 연구 및 관리를 위한 중·장기 연구계획, 환경부 2003.
- 연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 개발, 환경부 1998.
- 화학물질정보센터 (KCIC, Korean Chemicals Information Center). <http://kcic.nier.go.kr/>, 2003.
- 환경부. 수도권 대기질 개선 특별대책 (시안)-수도권 대기질 개선에 관한 공개토론회 발표자료, 수도권대기질개선추진기획단, 2002a.
- 환경부. 환경백서, 2002b.
- 환경부. 화학물질 배출량 조사 결과(1999~2000), 2002c.
- ECB (European Chemical Bureau). <http://ecb.jrc.it>, 2003.
- Environment Canada. The ARET substance selection process and guideline, 1994.
- Erin MS, Shane AS, John PG *et al.* SCRAM : A Scoring and Ranking System for Persistent, Bioaccumulative, and Toxic Substances for the North American Great Lakes-Part I : Structure of the Scoring and Ranking System, Environmental Science and Pollution Research 2000; 7(1): 1-11.
- EU (European Union). IUCLID (International Uniform Chemical Information Database), 1996.
- Gary AD, Mary BS and Sheila J. Comparative evaluation of chemical ranking and scoring methodologies, US EPA 1994.
- Hansen BG, Haelst AL *et al.* Priority setting for existing chemicals: The European Union risk ranking method, Environmental Toxicity and chemistry 1999; 18: 772-779.
- HSDB (Hazardous Substances Data Bank). <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>, 2003.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). <http://www.iarc.fr/>, 2003.
- Layton DW *et al.* Deriving allowable daily intakes for systemic toxicants lacking chronic toxicity data, Regulatory toxicology and pharmacology 1987; 7: 96-112.
- Mary BS and Adam CS. Chemical ranking and scoring : Guidelines for relative assessment of chemicals, SETAC press, 1997a.
- Mary BS, Gary AD, Lori EK *et al.* A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, Environmental Toxicology and Chemistry 1997b; 16(2): 372-383.
- NTP (National Toxicology Program). <http://ntp-server.niehs.nih.gov/>, 2003.
- Rachel RM, Cheryl LS, Shari AB *et al.* SCRAM: A Scoring and Ranking System for persistent, bioaccumulative, and toxic Substances for the north american great lakes resulting chemical scores and rankings, Human and Ecological Risk Assessment 2002; 8(3): 537-557.
- US EPA IRIS. www.epa.gov/iris, 2003.
- US EPA. EPIwin (Estimation Programs Interface for Windows), 2001.
- US EPA. Guidelines for carcinogen risk assessment, 1999.
- US EPA. Guidelines for neurotoxicity risk assessment, 1998a.
- US EPA. Chemical Screening Report for the RCRA PBT

- List Docket, 1998b.
- US EPA. Guidelines for reproductive toxicity risk assessment, 1996.
- US EPA. Comparative evaluation of chemical ranking and scoring methodology, 1994a.
- US EPA. Chemical hazard evaluation for management strategies; A method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, 1994b.
- US EPA. Guidelines for developmental toxicity risk assessment, 1991.
- US EPA. Guidelines for mutagenicity risk assessment, 1986.